نشریهٔ مهندسی عمران فردوسی DOI: 10.22067/civil.v31i1.58911 سال سی و یک، شمارهٔ یک، ۱۳۹۷

تأثیر نسبت محلول قلیایی به سرباره بر نفوذپذیری بتن قلیافعال سرباره‌ای*

کیاچهر بهفرنیا[۱] مجید رستمی گله‌دار[۲]

چکیده در این تحقیق، تأثیر نسبت محلول قلیایی به سرباره بر نفوذپذیری بتن قلیافعال سرباره‌ای با آزمایش‌های مختلف مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. امروزه نقش بتن به‌عنوان پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی، در توسعهٔ زیرساخت‌های عمرانی و اقتصادی جوامع امری انکارناپذیر است. یکی از راهکارهای تولید بتنی سازگار با محیط زیست و کاهش اثرات مخرب مرتبط با تولید سیمان پرتلند، استفاده از بتن قلیافعال سرباره‌ای می‌باشد که از طریق فعال‌سازی خاصیت چسبندگی سربارهٔ کورهٔ بلند در یک محلول قلیایی تولید می‌شود. ازآنجاکه نفوذپذیر بودن بتن در پایایی و دوام آن نقش مؤثری دارد، در این تحقیق با متغیر درنظر گرفتن نسبت محلول قلیایی به سرباره، پارامترهای نفوذ یون کلر به‌روش RCPT، عمق نفوذ آب، جذب آب کوتاه‌مدت و نهایی و مقاومت فشاری به‌دست می‌آید. مقادیری که برای نسبت محلول قلیایی به سرباره درنظر گرفته شد، ۰/۴ ، ۰/۴۵، ۰/۵ و ۰/۵۵ می‌باشد؛ یک طرح با سیمان پرتلند معمولی به‌عنوان طرح کنترل برای مقایسه و ارزیابی با بتن قلیافعال سرباره‌ای ساخته شد. همچنین با استفاده از عکس‌برداری با میکرو سکوپ الکترونی روبشی (تست SEM) مقایسه‌ای ساختاری بین بتن قلیافعال سرباره‌ای و بتن با سیمان پرتلند معمولی انجام شد. نتایج نشان داد که نسبت محلول قلیایی به سرباره ۰/۴۵ و ۰/۵ برای تولید بتن قلیافعال سرباره‌ای از لحاظ دوام و نفوذپذیری مقادیر بهینه‌ای می‌باشند.

واژه‌های کلیدی قلیا فعال، سرباره، محلول قلیایی، نفوذپذیری.

The Effect of Alkaline Solution-to-Slag Ratio on Permeability of Alkali Activated Slag Concrete

K. Behfarniya M. Rostami Galedar

Abstract *This study investigated the effect of alkaline solution-to-slag ratio on permeability of Alkali-Activated Slag Concrete (AASC). Concrete, as the most widely used building material, has an undeniably important role in development of economic and civic infrastructure. Alkali activated slag cement is an environmentally friendly alternative to Portland cement, which can be produced by using an alkaline solution to activate the binding effect of the blast furnace slag. Permeability of concrete has a direct impact on its durability, so in this study a series of tests were arranged to examine the effect of alkaline solution-to-slag ratio on water impermeability, chloride permeability, short-term and total water absorption and compressive strength of AASC specimens. In experimental study four concrete mixes with alkaline solution-to-slag ratios of 0.4, 0.45, 0.50, and 0.55 were considered. One mix made by ordinary Portland cement were also considered for comparison of results. In addition, The images taken from samples AASC and Ordinary Portland Cement Concrete (OPCC) by means of scanning electron microscopy (SEM) were used to study the comparison of microstructure. The results showed that the alkaline solution/slag ratios of 0.45 and 0.50 are the optimum values for AASC production from the durability and permeability point of view.*

Key Words Alkali Activated; Slag; alkaline solution; permeability.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۵/۵/۲۶ و تاریخ پذیرش آن ۹۶/۸/۳۰ می‌باشد.

(۱) دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.

(۲) کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

Email: kia@cc.iut.ac.ir

مقدمه

مزیت‌های بتن مانند قالب‌پذیری راحت، مقاومت در برابر آتش، تولید راحت و درنهایت ارزان بودن آن باعث شده است که از این ماده استقبال خوبی به‌عمل آید و به‌عنوان یکی از پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی معرفی گردد [1]. براساس برخی مطالعات صورت‌گرفته، سالانه حدود ۱۲۰۰۰ میلیون تن بتن ساخته می‌شود و حدود ۱۶۰۰ میلیون تن سیمان در جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد [2]. این درحالی است که هر ساله ۳٪ به میزان تولید سیمان افزوده می‌شود [3]. طبق اعلام سازمان بین‌المللی انرژی بین ٦ تا ۷ درصد کل CO_2 تولیدی در جهان مربوط به صنعت سیمان می‌باشد [4]. همچنین گزارش شده است که تا سال ۲۰۱۵ تولید سیمان به ۳/۵ میلیون تن در سال می‌رسد که این امر باعث افزایش سهم صنعت سیمان در انتشار گاز CO_2 به ۱۸٪ می شود [8-5]. پس باتوجه به مصرف بالای بتن و نیاز روزافزون به تولید سیمان برای تهیهٔ آن، اهمیت مسائل زیست‌محیطی و خصوصا توجه به مسئلهٔ توسعهٔ پایدار، ضرورت بازنگری در تولید بتن و تحقیق و پژوهش دررابطه با به‌کارگیری فناوری‌های نوین برای ساخت بتن، آشکارتر است. توسعهٔ سیمان‌های قلیافعال به‌عنوان نسل سوم مواد سیمانی پس از آهک و سیمان پرتلند، تاریخچه‌ای نسبتا طولانی دارد. Purdon ایدهٔ تأثیر مواد قلیایی بر سرباره را توضیح داد و از سربارهٔ خالص به‌عنوان چسباننده بهره گرفت [9]. سیمان سرباره‌ای قلیا فعال که در تولید آن از ضایعات صنایع ذوب‌آهن و فولاد استفاده می‌شود، می‌تواند جایگزین مناسبی برای برخی کاربردهای سیمان پرتلند ازجمله ساخت قطعات پیش‌ساخته همچون تراورس راه‌آهن و همچنین در ساخت سازه‌های هیدرولیکی مورد استفاده قرار گیرد [11-10]. سیمان قلیافعال سرباره‌ای ترکیبی از مصالح طبیعی سیلیکات و آلومینا است. حلال قلیایی هیدروکسید سدیم یا هیدروکسید پتاسیم به‌طور جداگانه تهیه می‌گردد، سپس آن را به مایع سیلیکات سدیم اضافه می‌کنند و این حلال با مواد پوزولانی مخلوط می‌شود. بنابراین سیمان قلیافعال سرباره‌ای فرآورده‌های ضایعاتی را به محصول مفید تبدیل می‌کند و جهت کاهش مصرف سیمان و آلودگی محیط‌زیست در سازه‌ها به‌کار می‌روند [۱۲]. ملات‌های قلیافعال سرباره‌ای گسترش واکنش قلیایی سیلیسی کمتری نسبت به ملات سیمان پرتلندی دارند [13]. محققان بسیاری تأثیر عوامل مختلف بر مقاومت ملات‌های قلیافعال سرباره‌ای در برابر دمای بالا و همچنین تغییر ریزساختار آن را بررسی نموده‌اند [16-14]. اخیرا به‌جای سربارهٔ کورهٔ آهن‌گدازی از سربارهٔ فروکروم استفاده شده و برخی خصوصیات مکانیکی و دوام آن را مورد بررسی قرار داده‌اند [19-17].

پایایی بتن یکی از مهم‌ترین خصوصیات بتن می‌باشد، چون لازم است بتن در طول عمر سازه، شرایطی را که برای آن طراحی شده است، تحمل نماید. عوامل شیمیایی ازجمله عواملی است که در پایایی بتن نقش مؤثری دارد. حملهٔ سولفات‌ها، اسیدها، آب دریا و همچنین کلرورها، که خوردگی الکتروشیمیایی آرماتورهای فولادی را باعث می شود، ازجمله عوامل مخرب شیمیایی می‌باشند. ازآن‌جا که حمله در داخل جسم بتن انجام می‌شود، عوامل مهاجم باید قادر به نفوذ به داخل بتن باشد و بتن نیز نفوذپذیر باشد. بنابراین نفوذپذیری اهمیت خاصی دارد [۲۰].

موضوع نفوذپذیری در سازه‌های هیدرولیکی و در سازه‌های واقع در مجاورت دریا اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. در سازه‌های ساحلی به‌دلیل وجود یون کلر در آب دریا، عمر مفید سازه برابر با زمان رسیدن رطوبت به سطح میلگرد تعریف می‌گردد.

دیگر عوامل مخرب که به عامل نفوذپذیری بتن وابسته‌اند عبارت است از:

- تخریب بر اثر یخزدگی و آب‌شدن متناوب بتن (سیکل ذوب و انجماد در زمستان).
- تخریب بر اثر نفوذ سولفات‌های موجود در خاک و آب‌های زیرزمینی.
- تخریب بر اثر واکنش‌های کربناتاسیون.

بنابراین می‌توان با کاهش نفوذپذیری بتن باعث بهبود مشخصات دوام بتن و افزایش عمر مفید سازه گردید.

سیمان قلیافعال یک جایگزین مناسب برای بسیاری

از انواع سیمان می‌باشد. زیرا مواد اولیه مورد استفاده برای تولید آن، نسبت به سیمان‌های مرسوم و پلیمرهای آلی به‌وفور یافت می‌شود. همچنین بتن قلیافعال سرباره‌ای درمقایسه با بتن معمولی دارای مقاومت فشاری و کششی بیشتر است، سرعت کسب مقاومت آن بالاست، تخلخل و نفوذپذیری کمتری دارد و دربرابر حملات شیمیایی مقاوم است [26-21]. همچنین بتن‌های قلیافعال نسبت به بتن با سیمان پرتلندی در برابر آتش مقاومت بیشتری دارند [27].

جوزف داویدویتس[28] چنین اظهار داشت که یک محلول قلیایی می‌تواند با سیلیسیم موجود در یک ماده با منشأ طبیعی (آلومینا سیلیکات‌ها) واکنش دهد و یک مادهٔ چسباننده تولید کند. از لحاظ تئوری، هر ماده‌ای که دارای ترکیبات سیلیسیم و آلومینیوم باشد می‌تواند قلیافعال شود. سدیم هیدروکسید، پتاسیم هیدروکسید، سدیم کربنات یا ترکیبی از سدیم- پتاسیم هیدروکسید با سدیم سیلیکات و پتاسیم سیلیکات رایج‌ترین فعال‌کننده‌های مورد استفاده می‌باشند. ترکیبی از سدیم هیدروکسید با سدیم سیلیکات مؤثرترین محلول قلیایی مورد استفاده است که بهترین ترکیب را برای رسیدن به مقاومت بالا فراهم می‌کند [29]. Balcikanli و Ozbay تأثیر دمای عمل‌آوری، زمان عمل‌آوری، غلظت سدیم و مدول سیلیکات را بر مقاومت فشاری، نفوذ یون کلر و نفوذ اکسیژن بتن قلیافعال سرباره‌ای مورد بررسی و مقادیر بهینه را ارائه دادند و در تمام طرح اختلاط‌ها نسبت محلول قلیایی به سرباره را برابر ۰/۵۳ درنظر گرفتند [30]. شجاعی و همکاران تأثیر نسبت محلول قلیایی به سرباره را بر خصوصیات مکانیکی بتن قلیافعال سرباره‌ای بررسی نمودند و مقدار ۰/۵ را به‌عنوان مقدار بهینه معرفی کردند [10]. تولید صنعتی سیمان سربارهٔ قلیافعال (AAS) از اوکراین و در سال‌های ۱۹۶۴-۱۹۶۰آغاز شد. در دههٔ ۱۹۶۰ میلادی، چندین ساختمان آپارتمانی و سازه‌های دیگر با به‌کارگیری سیمان‌های قلیا فعال سرباره‌ای در اوکراین ساخته شد که باوجود آب و هوای نامناسب آن منطقه، هنوز به شکل مطلوبی پایدار مانده‌اند [31]. سرباره یک محصول جانبی در صنایع متالورژی است که می‌تواند به‌وسیلهٔ قلیایی‌های فعال‌شده، ترکیب سیمانی و چسبنده تولید کند. استفاده از سرباره به‌عنوان ضایعات صنایع فولاد، استفاده کمتر از انرژی در تولید آن و ورود کمتر CO_2 به محیط از مزایای عمدهٔ آن می‌باشد.

در این تحقیق با بررسی نسبت محلول قلیایی به سرباره به‌عنوان یک پارامتر مؤثر در بتن قلیافعال سرباره‌ای، بااستفاده از آزمایش‌های نفوذناپذیری آب، نفوذ تسریع‌شده یون کلر (RCPT)، جذب آب اولیه و نهایی و مقاومت فشاری، نفوذپذیری بتن قلیافعال سرباره‌ای مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت و همچنین یک طرح با سیمان پرتلند معمولی به‌عنوان طرح کنترل ساخته شد و مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت و بااستفاده از تست SEM، از لحاظ ساختاری هم مقایسه‌ای بین آنها انجام شد. لازم به ذکر است که تمام نمونه‌ها در آب عمل‌آوری شدند.

مطالعات آزمایشگاهی

مصالح مورد استفاده. سرباره مادهٔ اصلی چسباننده در ترکیب بتن قلیافعال سرباره‌ای است. سرباره‌ای که در این تحقیق استفاده شد، سربارهٔ کورهٔ بلند کارخانه ذوب‌آهن اصفهان بود (به‌شکل گرانوله) که به‌صورت آسیاب‌شده از کارخانه سیمان سپاهان اصفهان تهیه شد. نتیجهٔ آنالیز شیمیایی (XRF) سربارهٔ مورد استفاده در جدول (۱) ذکر گردیده است. وزن مخصوص سربارهٔ ذکرشده g/cm^3 ۲/۸۵ و بلین آن حدود cm^2/g ٤٥۰۰ می‌باشد.

همچنین به‌منظور فعال‌سازی سرباره، از هیدروکسید سدیم (NaOH) جامد و از محلول سیلیکات سدیم (Na_2SiO_3)، با درصد وزنی ترکیبات شیمیایی ارائه‌شده در جدول (۲) استفاده شد.

جدول ۱ نتیجهٔ آنالیز شیمیایی (XRF) سربارهٔ کورهٔ بلند ذوب‌آهن اصفهان

ترکیبات	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O
درصد	۳۵/۸۵	۱۳/۳۹	۱/۰۶	۳۷/۷۱	۹/۱	۲/۵۲	۰/۵۸	۰/۴۸

جدول ۲ مشخصات شیمیایی محلول سیلیکات سدیم

ترکیب شیمیایی	درصد وزنی
SiO_2	٪۳۶/۵
Na_2O	٪۱۵/۵
H_2O	٪۴۸

جدول ۳ مشخصات شن مصرفی

جنس	حداکثر قطر سنگدانه‌ها	درصد جذب آب	چگالی نسبی در حالت خشک	چگالی درحالت خشک (kg/m^3)	چگالی ظاهری (kg/m^3)
آهکی	۱۲/۵ mm	۰/۸۴	۲/۶۹	۲۶۸۳/۷	۱۷۴۸/۵

در انجام این تحقیق سنگ‌دانه‌های آهکی که از معادن اطراف اصفهان تهیه شده است، مورد استفاده قرار گرفت. مدول نرمی ماسهٔ مصرفی ۳/۰۵ بود که در محدودهٔ مجاز استاندارد ASTM C33 [32] قرار داشت. در جدول (۳) مشخصات شن مصرفی در این تحقیق که با آزمایش طبق استاندارد ASTM C127 [33] به‌دست‌آمده ذکر شده است.

طرح اختلاط و ساخت نمونه‌ها. در این تحقیق برای ساخت نمونه‌ها، از قالب‌های مکعبی ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر، قالب‌های استوانه‌ای ۲۰۰×۱۰۰ میلی‌متر و همچنین از قالب‌های مکعبی ۱۲۰×۲۰۰×۲۰۰ میلی‌متر استفاده شد (قالب‌ها در دو لایه ریخته می‌شوند و هر لایه به‌مدت حدود ۱۰ ثانیه ویبره می‌شود). قالب‌های پرشده را به‌مدت ۲۴ ساعت در شرایط معمولی آزمایشگاه (دمای ۲±۲۳ درجه سانتی‌گراد) نگهداری می‌کنند و سپس نمونه‌ها از قالب خارج می‌شوند و تا زمان آزمایش در حوضچهٔ آب قرار می‌گیرند. درصد مصالح به‌کاررفته در طرح اختلاط‌های مختلف در جدول (٤) آمده است. در تمام طرح‌ها نسبت آب به مصالح جامد ۰/٤۸، غلظت محلول هیدروکسید سدیم ٤ مولار و همچنین نسبت هیدروکسید سدیم به سیلیکات سدیم ۳ درنظر گرفته شده است. همچنین یک طرح بتن معمولی با سیمان پرتلند ٤۲۵-۱ به‌عنوان طرح کنترل استفاده شده است.

جدول ٤ درصد مصالح به‌کاررفته در طرح اختلاط‌ها

شماره طرح	شن (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)	سرباره (kg/m^3)	نسبت محلول قلیایی به پوزولان
۱	۸۱۰	۹۹۰	٤۲۸/۵۷۱	۰/٤
۲	۸۱۰	۹۹۰	٤۱۳/۷۹۳	۰/٤۵
۳	۸۱۰	۹۹۰	٤۰۰	۰/۵
٤	۸۱۰	۹۹۰	۳۸۷/۰۹۷	۰/۵۵

نحوهٔ انجام و نتایج آزمایش‌ها

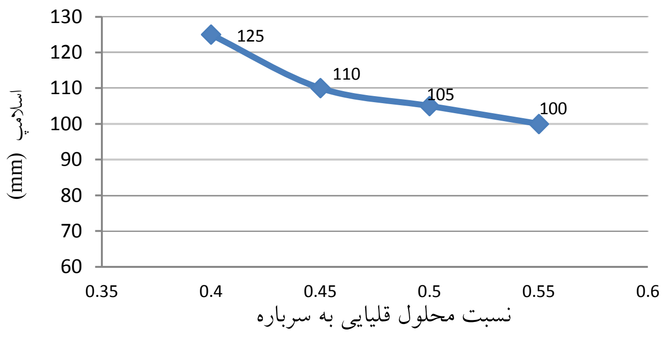
اسلامپ. آزمایش اسلامپ طبق استاندارد ASTM C143 [34] انجام شد. به‌منظور بررسی تأثیر نسبت محلول قلیایی به سرباره بر اسلامپ، نمودار نتایج آزمایش اسلامپ برحسب نسبت محلول قلیایی به سرباره رسم و در شکل (۱) نشان داده شده است.

همان‌طور که در نمودار شکل (۱) مشخص است، با افزایش نسبت محلول قلیایی به سرباره، اسلامپ کاهش می‌یابد. به‌طوری‌که افزایش این نسبت از ۰/۴ به ۰/۴۵ باعث کاهش ۱۵ میلی‌متری اسلامپ و از ۰/۴۵ به ۰/۵ و از ۰/۵ به ۰/۵۵ باعث کاهش ۵ میلی‌متری اسلامپ می‌شود. بنابراین چنین می‌توان استدلال کرد که در یک نسبت آب به مواد جامد ثابت (در اینجا ۰/۴۸) با افزایش مقدار محلول قلیایی، غلظت محلول قلیایی در مخلوط بالاتر می‌شود و میزان شدت واکنش‌های شیمیایی بین سرباره و محلول بیشتر می‌گردد، که کاهش اسلامپ را در پی خواهد داشت. همچنین ازآنجایی‌که درصد زیادی از محلول قلیایی را آب تشکیل می‌دهد، با افزایش نسبت محلول قلیایی به سرباره کاهش نرخ اسلامپ بعد از ۰/۴۵ مشاهده می‌شود.

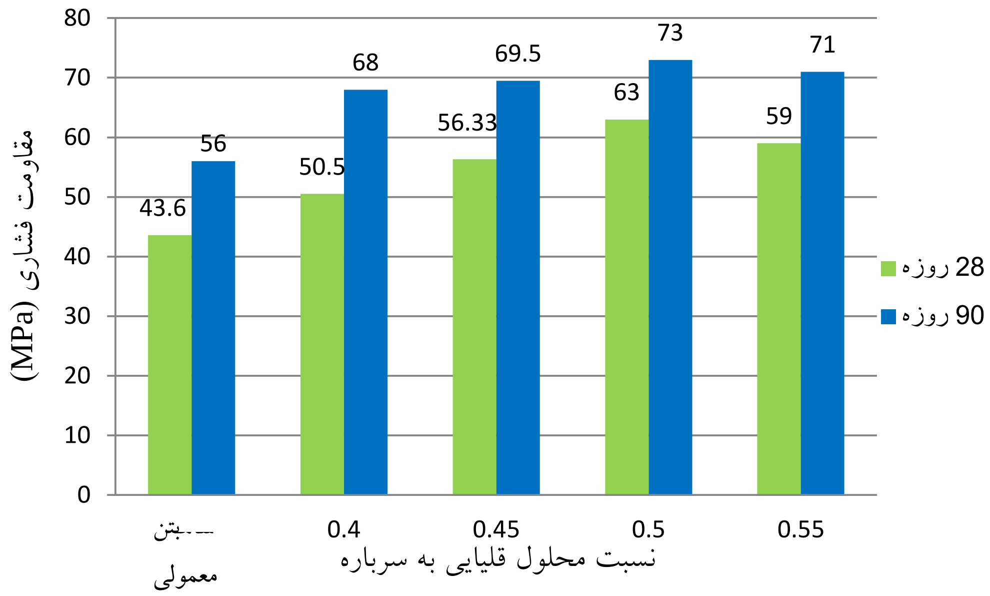
مقاومت فشاری

در این تحقیق، مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی مکعبی در سنین ۲۸ و ۹۰ روز طبق استاندارد BS EN 12390-3 [35] اندازه‌گیری شده است. به‌منظور بررسی تأثیر نسبت محلول قلیایی به سرباره بر مقاومت فشاری، نمودار تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روز در شکل (۲) ترسیم شده است. همچنین از نمونهٔ بتن معمولی (بتن با سیمان پرتلند معمولی با مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۴۳/۶ مگاپاسکال) به‌عنوان طرح کنترل استفاده شده است. قابل ذکر است که در هر سن و برای هر طرح سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفت و اعداد ذکرشده در نمودار، میانگین مقاومت فشاری سه نمونه را در هر سن نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل (۲) ملاحظه می‌شود، با افزایش نسبت محلول قلیایی به سرباره تا مقدار ۰/۵ مقاومت فشاری افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. این عملکرد را می‌توان چنین استدلال کرد که سرباره برای فعال شدن به میزان کافی از محلول قلیایی نیاز دارد و مقادیر کمتر منجر به عدم فعال‌شدن قسمتی از سرباره می‌شود؛ بنابراین با افزایش مقدار محلول قلیایی، مقدار آب اضافی کمتری به مخلوط اضافه می‌شود؛ درنتیجه غلظت محلول قلیایی در مخلوط بالاتر می‌شود و واکنش‌های شیمیایی بین سرباره و محلول بهتر انجام می‌شوند و مقاومت بیشتری حاصل می‌گردد؛ اما ازآن‌جایی‌که درصد زیادی از این محلول قلیایی را آب تشکیل می‌دهد (۴۸ درصد وزنی محلول سیلیکات سدیم و حدود ۸۵ درصد وزنی محلول هیدروکسید سدیم را آب تشکیل داده است) مقدار مازاد بر مصرف سرباره، باعث افزایش حفرات موئینه خواهد شد و درنتیجه، کاهش مقاومت فشاری را در پی خواهد داشت.



شکل ۱ تأثیر نسبت محلول قلیایی به سرباره بر اسلامپ



شکل ۲ تأثیر نسبت محلول قلیایی به سرباره بر مقاومت فشاری

همچنین باتوجه به شکل (۲) اگر مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روز بتن قلیافعال با بتن معمولی مقایسه شود ملاحظه می‌شود که مقاومت فشاری بتن قلیافعال در هر دو سن نسبت به بتن معمولی بیشتر است. به‌طور مثال، مقاومت فشاری ۲۸ روز بتن قلیافعال با نسبت محلول قلیایی به سرباره ۰/۵ برابر ٦۳ MPa و در بتن معمولی ٤۳/٦ MPa می‌باشد (حدود ۱/٤٤ برابر بتن معمولی) و مقاومت فشاری ۹۰ روز آن برابر ۷۳ MPa و در بتن معمولی MPa ٥٦ می‌باشد (حدود ۱/۳ برابر بتن معمولی)؛ همچنین از روی این نتایج می‌توان فهمید که بتن‌های قلیافعال زودتر از بتن معمولی به مقاومت نهایی می‌رسند.

آزمایش جذب آب اولیه و نهایی. در این بخش نتایج حاصل از آزمایش جذب آب کوتاه‌مدت که طبق استاندارد BS 1881: part122 و جذب آب نهایی که مطابق با استاندارد ASTM C642 [36] به‌دست آمده‌اند مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. در آزمایش جذب آب کوتاه‌مدت طبق استاندارد ابتدا نمونه را در اون کاملا خشک می‌کنند و سپس به مدت نیم ساعت در آب غرقاب می‌شود و طبق رابطهٔ (۱) درصد جذب آب کوتاه‌مدت یا نیم ساعته به‌دست می‌آید. این آزمایش کیفیت سطحی بتن مورد نظر را به‌دست می‌دهد. در آیین‌نامهٔ پایایی بتن در حاشیهٔ خلیج فارس و دریای عمان، معیارهایی برای شرایط مختلف محیطی حاکم با روش BS 1881 part122 درنظر گرفته شده که در جدول (۵) ارائه شده است [۳۷].

$$A=[(B-C)/C] \qquad (۱)$$

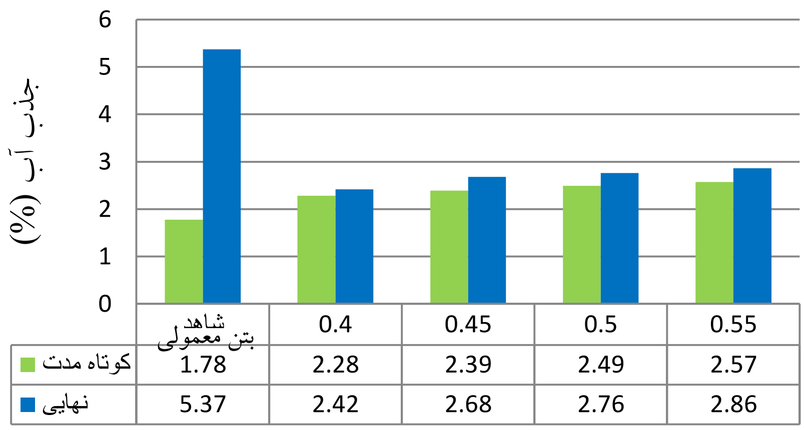
در رابطهٔ فوق، A درصد جذب آب؛ B جرم نمونه بعد از غوطه‌وری ۰/۵ساعته با سطح خشک‌شده در هوا برحسب گرم؛ C جرم نمونهٔ خشک‌شده در اون بعد از سردشدن نمونه در هوای خشک (دمای ۲۰°C تا ۲۵) برحسب گرم می‌باشد.

جدول ۵ مقادیر مجاز درصد جذب آب کوتاه‌مدت در شرایط مختلف محیطی [۳۷]

شرایط محیطی	درصد جذب آب (٪)
A	حداکثر ٤
B و C	حداکثر ۳
D، E و F	حداکثر ۲

در جدول (۵) شرایط محیطی از A به F بحرانی‌تر می‌شود. در آزمایش جذب آب نهایی طبق استاندارد ابتدا نمونه را کاملا خشک می‌کنیم، سپس تا رسیدن به وزن ثابت نمونه را غرقاب می‌کنیم و طبق رابطهٔ (۱)، درصد جذب آب نهایی به‌دست می‌آید. البته در رابطهٔ (۱)، B نشان‌دهندهٔ جرم نمونه در حالت اشباع با سطح خشک می‌باشد. قابل ذکر است که از هر طرح سه نمونه و پس از ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفت و مقدار میانگین آنها به‌عنوان نتیجه نهایی ثبت شد. نتایج جذب آب کوتاه‌مدت و نهایی در شکل (۳) ارائه شده است.

باتوجه به شکل (۳) ملاحظه می‌شود که با افزایش نسبت محلول قلیایی به سرباره میزان جذب آب کوتاه‌مدت و نهایی افزایش یافته است ولی این افزایش جذب آب بسیار ناچیز است؛ دلیل این افزایش جذب آب می‌تواند این باشد که با افزایش این نسبت، مقدار محلولی که به مخلوط اضافه می‌گردد، بیشتر می‌شود که باعث افزایش حفرات مویینه در بتن و درنتیجه افزایش جذب آب خواهد شد. همچنین اگر جذب آب کوتاه‌مدت و نهایی بتن قلیافعال با بتن معمولی مقایسه شود ملاحظه می‌شود که جذب آب کوتاه‌مدت بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی بیشتر است درحالی‌که جذب آب نهایی بتن قلیافعال بسیار کمتر از بتن معمولی می‌باشد. به‌طور مثال درصد جذب آب کوتاه‌مدت بتن قلیافعال با نسبت محلول قلیایی به سرباره ۰/۴۵ برابر ۲/۳۹٪ و در بتن معمولی ۱/۷۸٪ می‌باشد (حدود ۱/۳٤ برابر بتن معمولی) ولی درصد جذب آب نهایی آن برابر ۲/٦٨٪ و در بتن معمولی ۵/۳۷٪ می‌باشد (حدود ۰/۵ برابر بتن معمولی)؛ همچنین یکی از خصوصیات مهم بتن‌های قلیافعال این است که بین جذب آب کوتاه‌مدت و نهایی اختلاف زیادی وجود ندارد. به‌عنوان مثال، اگر بتن با نسبت محلول قلیایی به سرباره ۰/٤۵ درنظر گرفته شود، درصد جذب آب کوتاه‌مدت و نهایی به‌ترتیب برابر ۲/۳۹٪ و ۲/٦٨٪ است که اختلاف آنها ۰/۲۹٪ می‌باشد؛ یعنی جذب آب نهایی حدود ۱/۱۲ برابر جذب آب کوتاه‌مدت است؛ ولی در بتن معمولی این اختلاف ۳/۵۹٪ می‌باشد؛ یعنی جذب آب نهایی حدود ۳برابر جذب آب کوتاه‌مدت است. همچنین قابل ذکر است که مقادیر جذب آب کوتاه‌مدت برای تمامی نسبت‌های محلول قلیایی به سرباره باتوجه به جدول (۵) برای شرایط محیطی C مناسب است که طبق آیین‌نامهٔ ملی پایایی بتن در محیط خلیج فارس و دریای عمان شرایط محیطی C این‌گونه تعریف می‌شود: «قسمت‌هایی از سازه که در تماس با خاک است و بالای ناحیهٔ مویینگی خاک واقع شده است (به‌علت فشار کم آب یا وجود سیستم زهکشی، خطر نفوذ شدید آب از سطح به داخل بتن وجود ندارد) و یا قسمت‌هایی که دائما در زیر آب دریا واقع‌اند».



شکل ۳ تأثیر نسبت محلول قلیایی به سرباره بر جذب آب کوتاه‌مدت و نهایی

آزمایش نفوذ یون کلر به‌روش RCPT. ازآنجاکه در محیط‌های دریایی نفوذ یون کلرید به داخل بتن و خرابی ناشی از خوردگی میلگرد به‌عنوان مهم‌ترین عامل مخرب در سازه‌های بتن مسلح شناخته می‌شود تعیین میزان نفوذ یون کلرید از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد؛ بنابراین در این بخش نتایج حاصل از آزمایش نفوذ تسریع‌یافتهٔ یون کلرید مطابق با استاندارد ASTM C1202 [38] (به‌عنوان یکی از روش‌های کنترل کیفی برای تعیین نفوذ یون کلر) برحسب میزان بار الکتریکی عبورکرده مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. مقادیر بار الکتریکی عبوری درواقع سطح زیر منحنی میزان شدت جریان عبوری برحسب زمان برای نمونه می‌باشد. هرچه قدر میزان بار الکتریکی عبوری از نمونه کمتر باشد معرف این است که بتن در برابر نفوذ یون کلرید مقاوم‌تر می‌باشد. طبقه‌بندی بتن‌ها را می‌توان طبق ASTM C1202 به‌صورت جدول (٦) دانست [38].

در این تحقیق آزمایش نفوذ یون کلر طبق استاندارد ASTM C1202 انجام شده است (نمونه‌ها در سن ۲۸ روز و ۹۰ روز قرار داشتند). برای افزایش دقت کار سیکل زمانی آزمایش از ۳۰ دقیقه به ۲۰ دقیقه کاهش داده شد؛ به طوری‌که در مدت زمان ٦ ساعت برای هر نمونه مجموعا ۱۹ داده ثبت شد. از هر طرح ۳ نمونه مورد آزمایش قرار گرفت و میانگین سه نمونه به‌عنوان نتیجهٔ نهایی ثبت گردید. بااستفاده از رابطهٔ (۲) میزان جریان عبوری برحسب کولمب محاسبه می‌شود. شکل (٤) مراحل انجام آزمایش نفوذ تسریع‌یافتهٔ یون کلرید (RCPT) واقع در آزمایشگاه مصالح دانشکدهٔ عمران دانشگاه صنعتی اصفهان را نشان می‌دهد. در شکل (۵) نتایج نهایی تست RCPT ذکر شده است.

$$Q= 600 (I_0+ I_{20}+I_{40} + ... + I_{320} + I_{340} + I_{360}) \quad (۲)$$

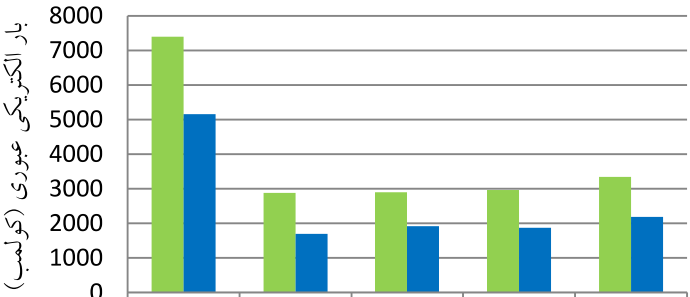
که در آن Q میزان جریان عبوری برحسب کولمب؛ I_0 جریان (آمپر) بلافاصله پس از اعمال ولتاژ اولیه؛ I_t جریان (آمپر) که در t دقیقه پس از اعمال ولتاژ خوانده می‌شود.

جدول ٦ نفوذپذیری در برابر یون کلرید براساس میزان جریان عبوری [38]

نفوذپذیری در برابر یون کلر	زیاد	متوسط	کم	خیلی کم	ناچیز
میزان جریان عبوری (کولومب)	٤۰۰۰ <	۲۰۰۰ تا ٤۰۰۰	۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰	۱۰۰ تا ۱۰۰۰	۱۰۰>



شکل ٤ مراحل انجام آزمایش نفوذ تسریع‌یافتهٔ یون کلرید: (۱) برش نمونهٔ استوانه‌ای به‌ارتفاع ۵ سانتی‌متر، (۲) عایق‌کردن نمونه با رزین، (۳) قرارگیری نمونه‌ها در محفظهٔ خلأ، (٤) ثبت بار الکتریکی عبوری از نمونه توسط دستگاه عبور جریان



	بتن معمولی	0.4	0.45	0.5	0.55
28 روزه	7399	2879	2897	2966	3345
90 روزه	5153	1697	1923	1870	2191

شکل ۵ تأثیر نسبت محلول قلیایی به سرباره بر بار الکتریکی عبوری

همان‌طور که در نمودار شکل (۵) ملاحظه می‌شود، با افزایش نسبت محلول قلیایی به سرباره مقدار بار الکتریکی عبوری در هر دو سن ۲۸ و ۹۰ روز افزایش می‌یابد. درواقع با افزایش این مقدار مقاومت در برابر نفوذ یون کلر کاهش خواهد یافت. این عملکرد را می‌توان چنین استدلال کرد که با افزایش این نسبت باتوجه به نتایج آزمایش اسلامپ مقدار کارایی بتن کاهش می‌یابد و درنتیجه باعث ایجاد حفرات در ماتریس بتن می‌گردد که با کاهش مقاومت در برابر نفوذ تسریع‌شدهٔ یون کلر همراه است؛ همچنین دلیل دیگر دخیل در این امر می‌تواند پایین بودن درصد خلوص NaOH مصرفی در این تحقیق باشد زیرا تست RCPT علاوه بر یون کلر به یون‌های دیگری هم حساس است که با افزایش میزان محلول قلیایی، یون‌های ناخالص موجود در محلول هم افزایش پیدا می‌کنند و همین امر باعث افزایش میزان بار الکتریکی عبوری خواهد شد. باتوجه به نتایج تست RCPT و طبق جدول (٦) همهٔ طرح‌های بتن قلیافعال سرباره‌ای در محدودهٔ متوسط قرار دارند و طبق آیین‌نامهٔ ملی پایایی بتن در محیط خلیج فارس و دریای عمان طرح‌های با نسبت محلول قلیایی به سرباره ۰/٤ تا ۰/۵ در شرایط محیطی C قرار دارند. همچنین اگر مقدار بار الکتریکی عبوری بتن قلیافعال در سن ۲۸ و ۹۰ روز با بتن معمولی مقایسه شود ملاحظه می‌شود که مقاومت در برابر نفوذ تسریع‌شدهٔ یون کلر بتن قلیافعال در هر دو سن نسبت به بتن معمولی بیشتر است. به‌طور مثال مقدار بار الکتریکی عبوری ۲۸ روز بتن قلیافعال با نسبت محلول قلیایی به سرباره ۰/٤ برابر ۲۸۷۹ کولمب و در بتن معمولی ۷۳۹۹ کولمب (حدود ۲/٦ برابر بتن قلیافعال) و در سن ۹۰ روز برای بتن قلیافعال برابر ۱٦۹۷ کولمب و در بتن معمولی ۵۱۵۳ کولمب (حدود ۳برابر بتن قلیافعال) می‌باشد؛ بنابراین از روی این نتایج می‌توان فهمید که بتن‌های قلیافعال سرباره‌ای درمقایسه با بتن معمولی عملکرد بسیار مناسب‌تری در برابر نفوذ یون کلر از خود نشان می‌دهند. با افزایش نسبت محلول قلیایی به سرباره مقدار بار الکتریکی عبوری در هر دو سن ۲۸ و ۹۰ روز افزایش می‌یابد.

آزمایش نفوذناپذیری آب. ازجمله عواملی که می‌تواند منجر به خوردگی بتن و آرماتورهای فولادی شود و نیز در سرمای شدید موجب ترک‌خوردن بتن گردد، نفوذ آب به داخل بتن می‌باشد؛ بنابراین نفوذ آب در بتن نقش مهمی را در سازه‌های بتنی ایفا می‌کند. در این بخش نتایج میزان عمق آب نفوذی، توسط آزمایش نفوذناپذیری دربرابر آب و بااستفاده از دستگاه نشان داده‌شده در شکل (٦)، مطابق با روش استاندارد EN 12390-8 [39] در سن ۲۸ روز به‌دست می‌آید و مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. در این روش، نمونهٔ بتنی ۷۲ ساعت از سطح زیرین تحت فشار ۵ بار قرار می‌گیرد و سپس نمونه از وسط به دو نیم می‌شود و حداکثر عمق نفوذ آب طبق شکل (۷) به‌دست می‌آید.

بنابراین به‌منظور بررسی تأثیر نسبت محلول قلیایی به سرباره بر عمق نفوذ آب، نمودار تغییرات عمق نفوذ آب در شکل (۸) ترسیم شده است. همچنین از نمونهٔ بتن معمولی برای مقایسه با بتن قلیافعال سرباره‌ای استفاده شده است.

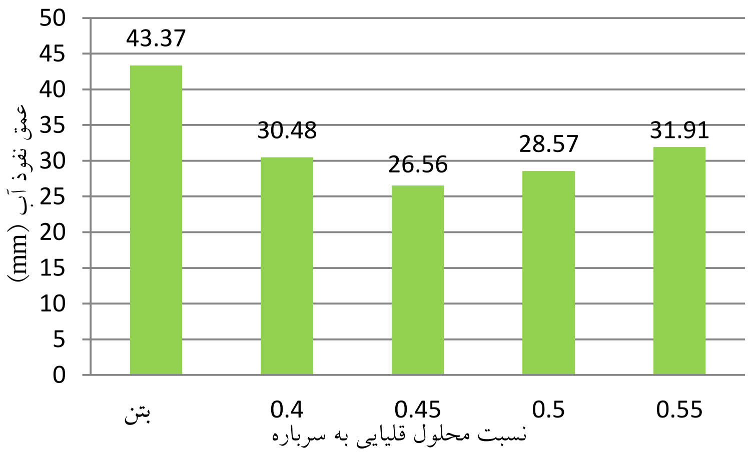
باتوجه به نمودار شکل (۸) ملاحظه می‌شود که کمترین عمق نفوذ آب در نسبت محلول قلیایی به سرباره برابر ۰/۴۵ اتفاق می‌افتد که مقدار آن برابر ۲۶/۵۶ میلی‌متر خواهد بود و اگر این نسبت از ۰/۴۵ کمتر یا بیشتر شود عمق نفوذ به‌تدریج افزایش می‌یابد که با کاهش این نسبت به ۰/٤ و با افزایش آن تا ۰/۵۵ عمق نفوذ آب به‌ترتیب حدود ۳/۹ و ۵/٤ میلی‌متر افزایش می‌یابد. این موضوع ممکن است به این علت اتفاق بیافتد که سرباره برای انجام واکنش‌های شیمیایی به‌مقدار بهینه‌ای از محلول قلیایی نیاز دارد که کمتر از این مقدار بهینه باعث می‌شود کل سرباره وارد واکنش نشود و باعث نفوذپذیری بیشتر شود و اگر هم مقدار محلول قلیایی بیشتر از مقدار بهینه استفاده شود باعث کاهش کارایی و درنتیجه ایجاد خلل و فرج در بتن می‌گردد و باز هم میزان نفوذپذیری دربرابر آب را افزایش می‌دهد. طبق آیین‌نامهٔ ملی پایایی بتن در محیط خلیج‌فارس و دریای عمان، مقدار عمق نفوذ آب برای بتن قلیافعال سرباره‌ای با نسبت محلول قلیایی به سرباره ۰/٤۵ و ۰/۵، برای شرایط محیطی C مناسب است که این شرایط محیطی جزو مناطق با طبقه‌بندی شدید قرار می‌گیرد. همچنین اگر مقایسه‌ای بین بتن قلیافعال و بتن معمولی انجام شود ملاحظه می‌شود که در تمام نسبت‌های محلول قلیایی به سرباره عمق نفوذ آب در بتن قلیافعال از بتن معمولی کمتر است. مثلا در بتن قلیافعال با نسبت محلول قلیایی به سرباره ۰/٤۵ عمق نفوذ برابر mm ۲٦/۵٦ و در بتن معمولی برابر mm ٤۳/۳۷ می‌باشد؛ یعنی عمق نفوذ آب در بتن معمولی حدود ۱/٦۳ برابر بتن قلیافعال سرباره‌ای می‌باشد.



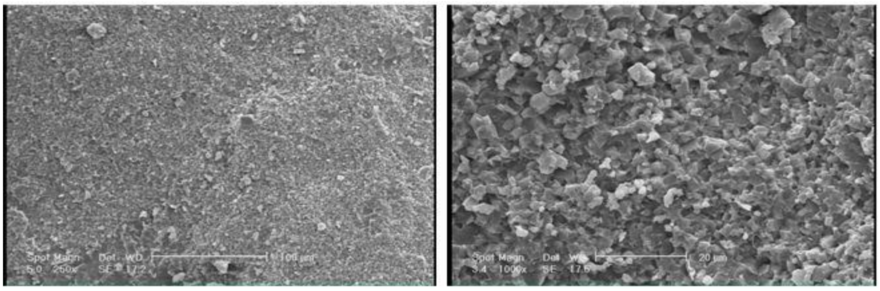
شکل ٦ دستگاه تست نفوذناپذیری آب طبق استاندارد EN 12390-8



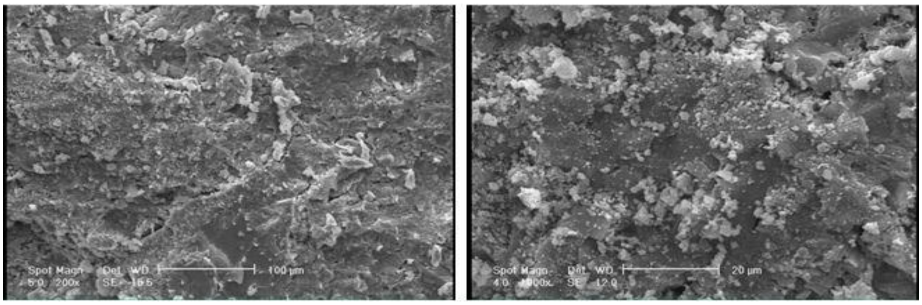
شکل ۷ نحوهٔ اندازه‌گیری عمق نفوذ آب



شکل ۸ تأثیر نسبت محلول قلیایی به سرباره بر عمق نفوذ آب



شکل ۹ تصویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه بتن قلیافعال سرباره‌ای



شکل ۱۰ تصویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه بتن سیمان پرتلندی

تست SEM . به‌منظور مقایسهٔ ساختار میکروسکوپی نمونه‌های بتن قلیافعال سرباره‌ای با نمونه‌های ساخته‌شده از سیمان پرتلندی، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از هر دو بتن تهیه شد که در شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان داده شده است.

شکل (۹) تصاویر SEM از نمونهٔ بتن قلیافعال سرباره‌ای با نسبت محلول قلیایی به سرباره ۰/۴۵ و شکل (۱۰) تصاویر SEM از نمونه بتن با سیمان پرتلندی را نشان می‌دهد. با مقایسهٔ دو شکل (۹) و(۱۰) مشاهده می‌شود که نمونهٔ AASC ساختار منظم‌تری نسبت به نمونهٔ OPCC دارد و می‌تواند از دلایل بهتر بودن دوام بتن‌های قلیافعال سرباره‌ای نسبت به سیمان پرتلندی باشد. همچنین از نکات قابل توجه تصاویر و مقایسهٔ آنها با هم ساختار کریستاله‌ای‌تر بودن بتن‌های AAS نسبت به OPC است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر نسبت محلول قلیایی به سرباره در مقادیر مختلف بر نفوذپذیری بتن قلیافعال سرباره‌ای مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت. آزمایش‌هایی که بر تمام طرح‌های AASC و OPCC انجام شد شامل اسلامپ، مقاومت فشاری، جذب آب کوتاه‌مدت و نهایی، نفوذ تسریع‌یافتهٔ یون کلر (RCPT) و آزمایش نفوذناپذیری آب بود.

اهم نتایج به‌دست آمده به شرح زیر می‌باشد:

۱- باتوجه به نتایج به‌دست آمده در این تحقیق، نسبت محلول قلیایی به سرباره می‌تواند به‌عنوان یکی از پارامترهای تأثیرگذار در عملکرد بتن قلیافعال سرباره‌ای تلقی شود.

۲- در بتن قلیافعال سرباره‌ای، اختلاف بین درصد جذب آب کوتاه‌مدت و نهایی بسیار اندک است که این

خصوصیت می‌تواند یکی دیگر از نقاط قوت این بتن محسوب گردد.

۳- بتن قلیافعال سرباره‌ای درمقایسه با بتن معمولی در تمام آزمایش‌های انجام‌شده به‌جز آزمایش جذب آب کوتاه‌مدت، نتایج بسیار بهتری از خود نشان داده است.

٤- باتوجه به نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های انجام‌شده و طبق استانداردها وآیین‌نامه‌ها می‌توان نسبت محلول قلیایی به سرباره ۰/٤۵ و ۰/۵ را به‌عنوان مقدار بهینه در ساخت بتن قلیافعال سرباره‌ای معرفی نمود.

۵- برقراری ارتباط کیفی و کلی بین مقاومت فشاری و عمق نفوذ آب. در صورتی مقاومت فشاری افزایش/کاهش یابد، نفوذپذیری این نوع بتـن کاهش/ افزایش خواهد داشت.

٦- بتن‌های قلیافعال سرباره‌ای نسبت به سیمان پرتلندی ساختار منظم‌تر و کریستاله‌ای‌تری دارند.

مراجع

1. Behfarnia, K., Behravan, A., "Application of High Performance Polypropylene Fibers in Concrete Lining of Water Tunnels", *Materials & Design*, Vol. 55, pp. 274-279, (2014).

2. Malhotra,V.M. And Mehta, P.K., "High-performance, High-volume Fly Ash Concrete: Materials, Mixture, Proportioning, Properties, Construction Practice, and Case Histories", Ottawa, Canada, Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc, (2005).

3. Rangan, B.V. And Hardjto, D., "Development and Properties of Low Calcium Fly Ash Based Geopolymer Concrete", Research report GC-1, Faculty of Engineering, Curtins University of Technology, Perth, Australia, (2005).

4. Palomo, A., Fernández-Jiménez, A., López Hombrados, C. and Lleyda, J.L., "Railway Sleepers Made of Alkali Activated Fly Ash Concrete", *Revista Ingeniería*, Vol. 22, pp. 75-80, (2007).

5. Gartner, E., "Industrially Interesting Approaches to Low CO2 Cements", Cem. Concr. Res., Vol. 34, pp. 1489–1498, (2004).

6. Davidovits, J., "Global Warming Impact on the Cement and Aggregate Industries", World Resour. Rev, Vol. 6, pp. 263–278, (1994).

7. Junaid, M.T., Khennane, A., Kayali, O., Sadaoui, A., Picard, D., Fafard, M., "Aspects of the Deformational Behaviour of Alkali Activated Fly Ash Concrete at Elevated Temperatures", *Cement and Concrete research*, Vol. 60, pp. 24-29,(2014).

8. Delatte, J.A.F.G., "From Ancient Concrete to Geopolymers", Arts Metiers Mag., Pp. 8-16, (1993).

9. Juenger, M., Winnefeld, F., Provis, J. and Ideker, J., "Advances in Alternative Cementitious Binders", *Cement and concrete research*, Vol. 41, pp. 1232-1243, (2011).

10. Shojaei, M., Behfarnia, K. and Mohebi, R., "Application of Alkali-activated Slag Concrete in Railway Sleepers", *Materials & Design*, Vol. 69, pp. 89-95, (2015).

11. Mohebi, R., Behfarnia, K. and Shojaei, M., "Abrasion Resistance of Alkali-activated Slag Concrete Designed by Taguchi Method", *Construction and Building Materials*, Vol. 98, pp.792-798, (2015).

۱۲. احمدی. سارا، نورانیان. حسین، «سیمان سرباره‌ای قلیافعال»، فصلنامهٔ سرامیک ایران، ش. ۱۹و ۲۲، پاییز و زمستان (۱۳۸۸).

13. Shi, Z., Shi, C., Zhao, R. and Wan, S., "Comparison of Alkali–silica Reactions in Alkali-activated Slag and Portland Cement Mortars", *Materials and Structures*, Vol. 48, pp. 743-751, (2015).

14. Rashad, A.M., Zeedan, S.R. and Hassan, A.A., "Influence of the Activator Concentration of Sodium Silicate on the Thermal Properties of Alkali-activated Slag Pastes", *Construction and Building Materials*, Vol. 102, pp. 811-820, (2016).

15. Rashad, A.M., Sadek, D.M. and Hassan, H.A., "An Investigation on Blast-furnace Stag as Fine Aggregate in Alkali-activated Slag Mortars Subjected to Elevated Temperatures", *Journal of Cleaner Production*,Vol. 112, pp.1086-1096, (2016).

16. Türker, H.T., Balçikanli, M., Durmuş, İ.H., Özbay, E. and Erdemir, M., "Microstructural Alteration of Alkali Activated Slag Mortars Depend on Exposed High Temperature Level", *Construction and Building Materials*, Vol.104, pp.169-180, (2016).

17. Turkmen, I., Maras, M.M., Karakoc, M.B., Demirboga, R. and Kantarci, F., "Fire Resistance of Geopolymer Concrete Produced from Ferrochrome Slag by Alkali Activation Method", *International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, pp. 58-63, (2013).

18. Karakoç, M.B., Türkmen, İ., Maraş, M.M., Kantarci, F., Demirboğa, R. and Toprak, M.U., "Mechanical Properties and Setting Time of Ferrochrome Slag based Geopolymer Paste and Mortar", *Construction and Building Materials*, Vol. 72, pp.283-292, (2014).

19. Karakoç, M.B., Türkmen, İ., Maraş, M.M., Kantarci, F. and Demirboğa, R., "Sulfate Resistance of Ferrochrome Slag based Geopolymer Concrete", *Ceramics International*, Vol. 42, pp.1254-1260, (2016).

۲۰. رمضانیانپور. علی‌اکبر، شاه نظری. محمدرضا، «تکنولوژی بتن»، انتشارات علم و صنعت ۱۱۰ و انتشارات پرهام، تهران، (۱۳۹۰).

21. . Chen, W., Brouwers, H.J.H., "The Hydration of Slag, Part 1: Reaction Models for Alkali-activated Slag" , Journal of materials science, Vol. 42, pp. 428–443, (2007).

22. Bilim C., Karahan O., Atis C.D., Ilkentapar S., "Influence of Admixtures on the Properties of Alkali-activated Slag Mortars Subjected to Different Curing Conditions", *Materials & Design*, Vol. 44, pp. 540–547, (2013).

23. Bakharev, T., Sanjayan, J.G., Cheng, Y.B., "Resistance of Alkali-activated Slag Concrete to cid ttack", *Cement and Concrete research*, Vol. 33, pp. 1607–1611, (2003).

24. Bakharev, T., Sanjayan, J.G., Cheng, Y.B., "Sulphate Attack on Alkali-activated Slag Concrete", *Cement and Concrete research*, Vol. 32, pp. 211–216, (2002).

25. Puertas, F., Fernandez-Jimenez, A., "Mineralogical and Microstructural Characterization of Alkali-activated Fly Ash/Slag Pastes", *Cement and Concrete composites*, Vol. 25, pp. 287–292, (2003).

26. Roy, D.M., Jiang, W., Silsbee, M.R., "Chloride Diffusion in Ordinary, Blended, and Alkali-activated

Cement Pastes and its Relation to Other Properties", *Cement and Concrete research*, Vol. 30, pp. 1879–1884, (2000).

27. Türkmen, İ., Karakoç, M.B., Kantarcı, F., Maraş, M.M. and Demirboğa, R., "Fire Resistance of Geopolymer Concrete Produced from Elazığ Ferrochrome Slag", *Fire and Materials*, (2016).
28. Davidovits, J., "Geopolymers", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 37, pp. 1633-1656, (1991).
29. Rashad, A.M., "A Comprehensive Overview about the Influence of Different Admixtures and Additives on the Properties of Alkali-activated Fly Ash", *Materials & Design*, Vol. 53, pp. 1005-1025, (2014).
30. Balcikanli, M. and Ozbay, E., "Optimum Design of Alkali Activated Slag Concretes for the Low Oxygen/Chloride Ion Permeability and Thermal Conductivity", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 91, pp. 243-256, (2016).
31. Xu, H., Provis, J.L., van Deventer, J.S. and Krivenko, P.V., "Characterization of Aged Slag Concretes", *ACI Materials Journal*, Vol. 105, pp. 131-139, (2008).
32. ASTM C33., "Standard Specification for Concrete Aggregates", Annual Book of ASTM Standards, (2003).
33. ASTM C127., "Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate", Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, (2003).
34. ASTM C 143., "Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete", Annual Book of ASTM Standards, (2003).
35. EN 12390-3., "Testing Hardened Concrete – Part 3: Compressive Strength of Test Specimens", (2002).
36. ASTM C 642., "Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete", Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, (2003).

۳۷. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، «نشریهٔ شمارهٔ ض–٤۲۸: آیین‌نامهٔ ملی پایایی بتن در محیط خلیج فارس و دریای عمان»، چاپ اول، تهران، ایران، (۱۳۸۵).

38. ASTM C 1202., "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration", Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, (2003).
39. EN 12390-8., "Testing Hardened Concrete - Part 8: Depth of Penetration of Water Under Pressure", European Committee for Standardization, (2000).